

# 超高周波電力増幅IC内蔵樹脂基板技術

伊藤 正紀 星 真一  
飯長 裕

近年、Si材料を用いたCMOS製造プロセスの微細化にともないミリ波帯のような超高周波帯域で動作する無線送受信ICの研究・開発が活発に進められている<sup>1) 2)</sup>。特にベースバンドIC等周辺回路と併せて製造し、集積化することにより低コストでミリ波帯の送受信ICが提供されるようになる。これまで高コストで特定用途にしか需要がなかったミリ波帯送受信ICの家電製品への搭載が視野に入ってきた。60GHz帯においては、北米および欧州は57~64GHz、日本は59~66GHzの7GHzが免許不要帯域として設けられ、Wireless HD<sup>3)</sup> やIEEE802.15.3C<sup>4)</sup> 等の標準化活動が進められている。

無線伝送にミリ波帯を使用することで、従来使用している2.4GHz帯や5.8GHz帯に比べ非常に広い伝送帯域を用いることができ圧縮、伸張による遅延や電力消費が省けるという利点がある。しかし、Siを用いたICではミリ波帯出力電力が不十分であり、そのままでは伝送距離が1mに満たないため、高出力電力増幅器が必要である。さらにアンテナ等の外部回路の実装が求められる。特に波長の短いミリ波帯では回路設計、実装および評価が難しく、扱う側にとって高い敷居となっていた。

これらの問題を解決するために、化合物半導体材料を用いたミリ波帯電力増幅ICを樹脂基板に内蔵することにより、高コストなパッケージングや実装等の低コスト化を、さらに樹脂基板にミリ波帯の設計を盛り込むことにより、ミリ波帯IC取り扱いの簡便(モジュール)化を図った。

## 超高周波IC内蔵樹脂基板

超高周波のミリ波帯電力増幅ICを内蔵するためには、ICの前後でミリ波帯の信号を伝送する必要がある。そのため樹脂基板の特性として低い誘電正接が求められる。今回樹脂基板は、図1に示すように誘電率が2.2で誘電正接が0.0005とテフロン<sup>®</sup>\*1) 基板とほぼ同様の特性を持つ、グラフト・ポリマ材<sup>5)</sup> を使用した。従来高周波用の基板に使用されているテフロン基板は、その製造工程中に取り扱いの難しい金属ナトリウムを使用するが、グラフト・ポリマ材は従来の樹脂基板(FR4等)の製造工程をその

\*1) テフロンは、デュポン社の登録商標です。

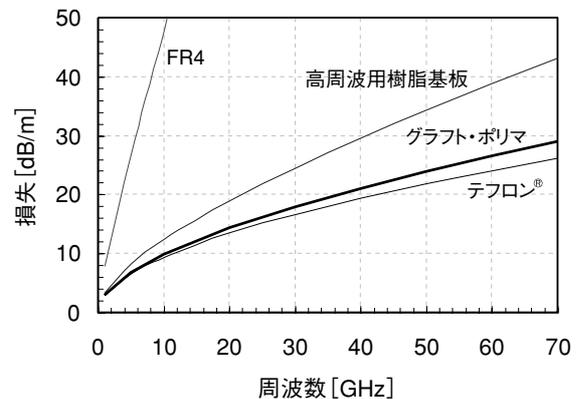


図1 樹脂基板の損失比較

まま使用できる利点がある。

搭載したミリ波電力増幅ICには200 μm厚に薄層化したInP-MMIC (インジウム燐 Monolithic Microwave IC) を用いた<sup>6)</sup>。ミリ波帯の電力増幅ICを樹脂基板に搭載する場合、以下に示す2点の問題が考えられる。

- ① 電力増幅ICはそのほとんどが入出力の特性インピーダンス (以下、 $Z_0$ ) が50 Ωで設計されており、樹脂基板上にも同様に $Z_0=50 \Omega$ の伝送線路を設けてICと接続しなければ、接続点で電力の反射が大きくなり伝送特性が大きく劣化する。しかし、ICと樹脂基板の誘電率や設計、製造方法の違いから、同じ $Z_0=50 \Omega$ の伝送線路幅は大きく異なる。
- ② 電力増幅ICはIC基板の薄層化およびヒートシンクを有するパッケージや金属ブロックに実装するのが一般的である。今回ICを内蔵する樹脂基板は熱伝導率が小さく熱を逃がしにくい材料であり、ICを内蔵することによるICの自己発熱により、信頼性の低下および電気特性の劣化が想定される。これらの問題を事前に検証した。

## IC内蔵樹脂基板の電気および熱設計

### (1) 伝送特性

ミリ波電力増幅ICを樹脂基板に内蔵するためには、図2に示すような樹脂基板中層にストリップ伝送線路を形成

する必要がある。伝送線路の設計に関しては、最新の高周波回路シミュレータを用いることにより、比較的精度良く設計することが可能である。また、今回は $Z_0=50\Omega$ 線路は製造および評価実績のある寸法を採用した。このときの線路幅は $400\mu\text{m}$ である。この線路幅に対してIC上の $Z_0=50\Omega$ 線路幅は $16\mu\text{m}$ であり、ボンディングパッドの寸法も $80\mu\text{m}$ であるためそのまま接続することは不可能である。IC上の寸法は変更不可なので樹脂基板上の電送線路幅を細くする必要がある。ICとの接続部の伝送線路幅はICのボンディングパッド寸法と基板製造ルールにより $100\mu\text{m}$ とした。この幅に対して入出力の反射が無視できる程小さくなるように図3に示すようなインピーダンス整合器を設計した。

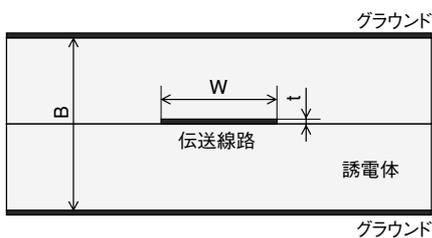


図2 ストリップライン概略

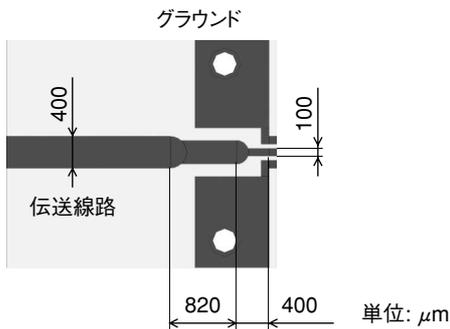


図3 インピーダンス整合器

使用した樹脂基板材料であるグラフト・ポリマ材は図1に示したとおり、良好な高周波特性を有しているが非常に柔らかく、高い温度に弱いという欠点がある。

この欠点は基板製造上、伝送線路幅や間隔のバラツキにつながる。これを考慮するために伝送線路の線路幅の依存性についてシミュレータを用いて検証した。結果、伝送線路幅が $\pm 10\%$ 程度のズレに対して $0.05\text{dB/cm}$ 程度の損失差であり、反射に関しても定在波比が1.5以下とミリ波帯で使用する部品と遜色ない値であることが判った。実際に使用する場合には、線路長は短くなり、製造バラツキに対しても補正が掛けられるので製品化する場合には問題無いと考えられる。

## (2) 温度特性

樹脂基板に内蔵した電力増幅ICは、最大出力電力 $60\text{mW}$ 程度のInP-MMICである。効率は約 $10\%$ 程度であり $600\text{mW}$ 程度が熱となって放出される。ICは図4に示すように伝送線路に対してフリップ・チップ（裏返し）実装されるので、ICの発熱部はアンダ・フィル側となる。アンダ・フィルは、チップを固定するために必要であり、基板貼り合わせ時のチップへのストレス緩和の役割も果たす。しかしアンダ・フィル材の主原料は樹脂なので、ICは完全に熱伝導率の悪い樹脂に囲まれることになる。

ICの基板材料であるインジウム燐は脆く、チップ取り扱い時や樹脂基板貼り合わせ時に割れ等の原因となるので、厚みを $200\mu\text{m}$ 以下とした。また、IC裏面に当たる樹脂基板表面側を $18\mu\text{m}$ 厚の銅箔だけにすると基板貼り合わせ時にICへストレスが掛かり割れに繋がる。そのため、 $10\mu\text{m}$ 程度樹脂を残す構造とした。IC表面で発生した熱は、樹脂の熱伝導率よりも低いIC基板を介して上方へと向かう。

IC裏面に銅箔が接着されると熱がそこから逃げるのでICの温度を低くすることが可能となるが、樹脂の残り厚さを製造上可能な限り薄くかつICが割れない厚さとした。結果として金バンプの高さを数 $\mu\text{m}$ 程度で調整することにより、図4のような形状となった。

図4に示す形状にて熱解析シミュレーションした基板表面温度の結果を図5に示す。基板裏面温度を $60^\circ\text{C}$ に固定し

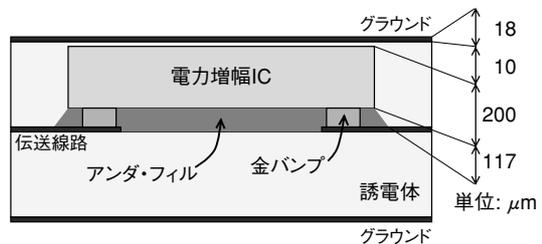


図4 IC内蔵基板断面図

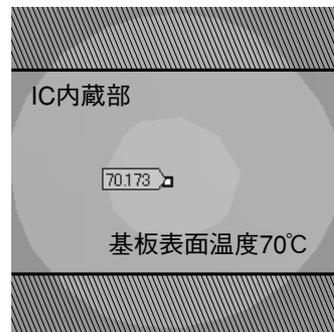


図5 基板表面温度のシミュレーション結果

たときの基板表面の温度が70℃程度であることが判る。またこのときのIC上の最高温度も83℃程度であり、使用時のICの温度上昇が13℃程度であることから、ICの仕様および使用上問題無いことが推察される。製品段階では基板表面にアルミなどの金属板が接続されるので、さらに熱放散は改善されると考えられる。

### IC内蔵樹脂基板の試作

図6にIC内蔵基板の製造工程の概略を示す。

下層樹脂基板上に前述で設計した伝送線路を2層金属に形成する。併せて、IC上に金バンプを形成する(図6-1)。ICを下層樹脂基板にフリップ・チップ実装する(図6-2)。IC実装後、ICの固定と上層樹脂基板の重ね合わせ時のICの割れ防止のためにアンダ・フィル材をICと樹脂基板の間に挿入する。併せて、ICを内蔵するための上層樹脂基板にICとほぼ同サイズのポケットを形成する(図6-3)。フリップ・チップ実装した基板とポケットを形成した基板を貼り合わせて、IC内蔵基板が出来上がる。図7にICを内蔵した基板、図8にIC内蔵部のX線写真をそれぞれ示す。基板表面は数μm程度段差があるが平坦である。金バンプも150μm間隔で並んでいることが確認できる。

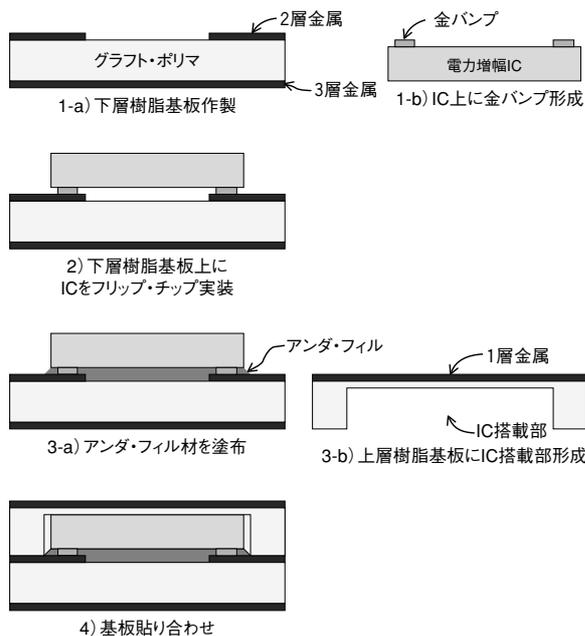


図6 製造工程

### IC内蔵樹脂基板の電気および熱特性

#### (1) 伝送特性

伝送線路長26.6mmにおける伝送損失の線路幅依存性の高周波回路シミュレータによる計算結果と測定値を図9に

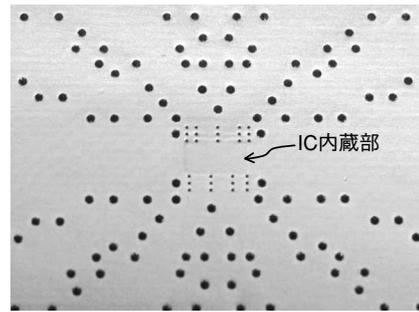


図7 実装後の基板表面写真

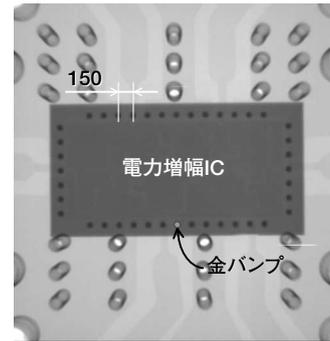


図8 X線写真

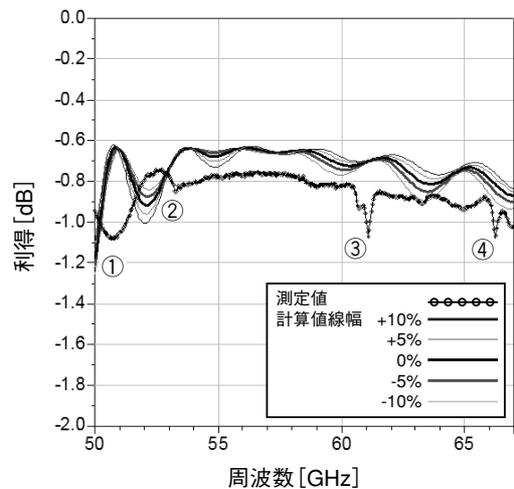


図9 伝送線路の線幅依存性と測定結果

示す。今回、伝送線路の設計値400μmに対して、出来上がりは380μmであった。図9から判るようにミリ波帯で使用する57~66GHz帯域において、伝送線路幅380μmの計算結果と、測定値は0.2dB以内の差であった。定在波の位置は、シミュレーションに対して2GHz程度低めにシフトしているが同様の結果が得られた。

最終的に試作した電力増幅IC内蔵基板の小信号利得特性を図10に示す。樹脂基板内蔵前のICの特性は、樹脂基

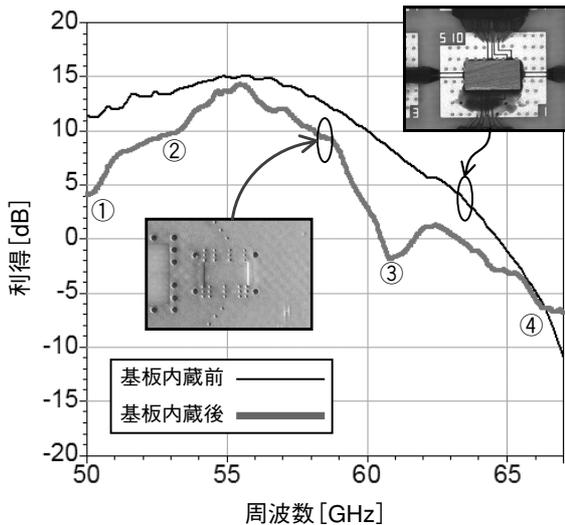


図10 小信号利得特性

板上にフリップ・チップ実装し、アンダ・フィル材でICを固定した後に、高周波プローブを用いて測定した（図10右上写真参照）。このときピーク周波数は55GHz、利得は15dBであった。樹脂基板内蔵後は前述の伝送線路、インピーダンス変換器や導波管変換器を介して測定している。このときピーク周波数は56GHz、利得は14dBであった。ピーク周波数と利得の差は小さく良好な一致と考える。ただし、帯域内にリップルがあり利得の大きな低下が見られる。リップルは図9、図10に示す①～④の位置にそれぞれ対応して見られる。リップルは、樹脂基板上へのフリップ・チップ実装時に観測されずに、樹脂基板内蔵時にのみ観測されていることから、IC、各変換器および外部回路への接続の相互影響が考えられる。

## (2) 温度特性

動作時の発熱量600mWの基板表面の温度分布を図11に示す。赤外線顕微鏡によって、基板裏面温度を60℃に固定して測定した。高温部の平均温度は69.6℃（最高温度71.2℃）と熱解析シミュレーションと同様の結果が得られた。この結果から、IC上の最高温度もシミュレーションと同様の結果が想定され、動作時のIC温度上昇は13℃程度と推定される。

## おわりに

今回、ミリ波帯電力増幅IC内蔵樹脂基板を試作した。

樹脂基板内蔵前後でICの伝送特性は、リップルの影響により利得が大きく低下している部分があるものの、54～59GHzの帯域で1～3dB程度の利得低下であり、周波数特性も考慮すると樹脂基板を用いた結果としては良好



図11 基板表面温度分布

であると考えられる。リップルも伝送線路や変換器の作り込みで充分改善可能である。

温度特性に関してもICの温度上昇は、13℃程度であり問題が無いことが確認された。

以上の経緯から、樹脂基板内に出力電力の大きいミリ波帯ICを内蔵したモジュール作製が可能であることが判った。さらに、樹脂基板内に高周波アナログ回路や受動回路（アンテナやフィルタ等）を形成することにより、外部回路との接続が容易になり、ミリ波帯のアプリケーション応用において、低コスト化が可能な技術を実証確認することができた。◆◆

## 参考文献

- 1) Y. Yoshihara, *et al.*: "A 60-GHz CMOS power amplifier with Marchand balun-based parallel power combiner", IEEE A-SSCC, pp.121-1246, Nov. 2008
- 2) M. Tanomura, *et al.*: "TX and RX front-ends for 60GHz band in 90nm standard bulk CMOS", Int. Solid-State Circuits Conf. Dig., pp.558-559, San Francisco, CA, Feb. 2008
- 3) <http://www.wirelesshd.org/index.html>
- 4) <http://www.ieee802.org/15/pub/TG3c.html>
- 5) <http://www.nof.co.jp/business/electron/product07.html>
- 6) S. Hoshi, *et al.*: "Double-Recessed 0.1- $\mu$ m-Gate InP HEMTs for 40Gbit/s Optical Communication Systems", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42 (2003), pp.2367-2370, Part.1, No.4B, April 2003

## 筆者紹介

伊藤正紀：Masanori Itoh. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ

星真一：Shinichi Hoshi. 研究開発センタ ネットワークテクノロジーラボラトリ

飯長裕：Hiroshi Iinaga. 沖プリントドサーキット株式会社